

# ΑΚΜΩΝ

**Υπολογιστικά εργαλεία και χρήση τους  
για μελέτες ασφάλειας ενεργειακών  
συστημάτων υδρογόνου**

# Υπολογιστικά εργαλεία και χρήση τους για μελέτες ασφάλειας ενεργειακών συστημάτων υδρογόνου

## Υπολογιστικά Εργαλεία

- Κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής ADREA-HF
- Γεωμετρικός προεπεξεργαστής DELTA\_B
- Κώδικας GAJET για υπολογισμό των συνθηκών έκλυσης από συστήματα υπό πίεση.

## Περίληψη

Το υδρογόνο αναμένεται να είναι μαζί με την ηλεκτρική ενέργεια, ο πλέον σημαντικός μελλοντικός φορέας ενέργειας για πολλές σταθερές και κινητές εφαρμογές, με προοπτική περιορισμού του φαινομένου του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή του.

Η ομαλή μετάβαση στην χρήση του υδρογόνου από τα μέλη του κοινωνικού συνόλου απαιτεί να διερευνηθούν, κατανοηθούν και επαρκώς αντιμετωπιστούν τα θέματα ασφάλειας που σχετίζονται με τις διάφορες εφαρμογές του. Παράγοντας κλειδί σ' αυτήν την διαδικασία είναι η εφαρμογή αξιολογημένων εργαλείων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Στην παρούσα έκθεση παρουσιάζεται εφαρμογή αξιολόγησης του πακέτου υπολογιστικής ρευστομηχανικής ADREA-HF για πρόβλεψη των συνεπειών διασποράς υδρογόνου. Η εφαρμογή αυτή αφορά σε πραγματικό ατύχημα έκλυσης περίπου 13.5 kg πεπιεσμένου υδρογόνου από διάταξη 18 διασυνδεδεμένων φιαλών των 50 λίτρων (200 bar πίεση λειτουργίας) σε περιβάλλον πόλης και σχετίζεται άμεσα με την μελλοντική χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο σε οχήματα.

## Εισαγωγή

Είναι αναγνωρισμένο σήμερα [1] ότι το υδρογόνο και ο ηλεκτρισμός ως φορείς ενέργειας, σε συνδυασμό με κύτταρα καυσίμου, τα οποία παρέχουν πολύ αποτελεσματικούς βαθμούς απόδοσης κατά την μετατροπή της χημικής ενέργειας, αποτελούν έναν από τους πλέον υποσχόμενους δρόμους για την επίτευξη ενός μέλλοντος χωρίς ρύπους, βασισμένου σε βιώσιμη ενέργεια.

Είναι επίσης γνωστό [2] ότι το υδρογόνο εισάγει θέματα ασφάλειας, καθόσον, όπως και τα άλλα συμβατικά καύσιμα εξάλλου, μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες να οδηγήσει σε φωτιά ή και έκρηξη. Επομένως για να είναι ομαλή η μετάβαση στην χρήση του από τα μέλη του γενικότερου κοινωνικού συνόλου θα πρέπει να διερευνηθούν σε βάθος και να κατανοηθούν τα θέματα ασφάλειας που σχετίζονται με την παραγωγή, αποθήκευση, διανομή και χρήση του.

Προς αυτή την κατεύθυνση η χρήση υπολογιστικών εργαλείων στην πρόβλεψη των συνεπειών έκλυσης, διασποράς και καύσης του υδρογόνου είναι επιτακτική, δεδομένων της πληθώρας των μελλοντικών εφαρμογών αλλά και του αυξημένου κόστους διεξαγωγής σχετικών πειραμάτων. Παράγοντας κλειδί σ' αυτήν την διαδικασία είναι η επαρκής αξιολόγηση των υπολογιστικών εργαλείων έναντι υπαρχόντων πειραμάτων ή ατυχημάτων.

Τα σχετικά πειράματα-ατυχήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, με βάση τον τρόπο αποθήκευσης του υδρογόνου. Εκλύσεις και διασπορά κρυογενικού υδρογόνου (LH<sub>2</sub>) αφενός και πεπιεσμένου αερίου υδρογόνου (CGH<sub>2</sub>) αφετέρου.

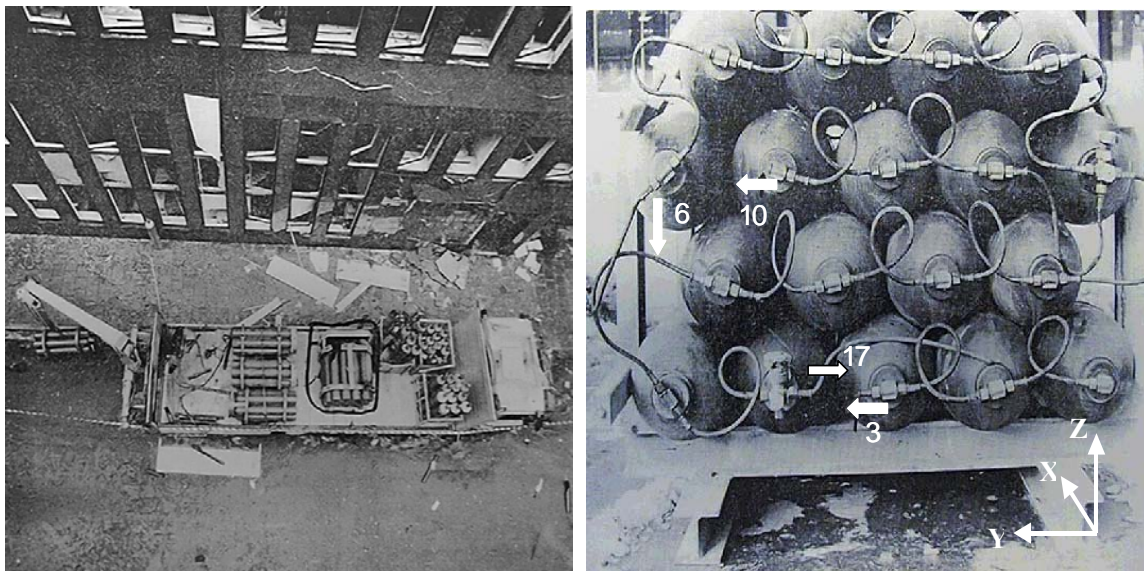
Πειράματα της πρώτης κατηγορίας που αφορούν σε διασπορά υδρογόνου μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [3-5]. Η αναφορά [3] αφορά σε πειράματα μεγάλης κλίμακας σε ανοικτό περιβάλλον. Η αναφορά [4] περιλαμβάνει πειράματα μεγάλης κλίμακας παρουσία κτιρίων. Η αναφορά [5] περιλαμβάνει πειράματα μικρής κλίμακας σε κλειστούς χώρους.

Πειράματα της δεύτερης κατηγορίας σχετικά με διασπορά υδρογόνου μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [6-12]. Η αναφορά [6] περιλαμβάνει πειράματα υδρογόνου μικρής κλίμακας σε ανοικτό περιβάλλον, ενώ στην [7] παρουσιάζονται πειράματα υδρογόνου μεγάλης κλίμακας σε ανοικτό περιβάλλον. Στις αναφορές [8-9] παρουσιάζονται εκλύσεις υδρογόνου χαμηλής ορμής σε κλειστό χώρο. Στην αναφορά [10] παρουσιάζονται εκλύσεις ηλίου χαμηλής ορμής σε κλειστό χώρο με άνοιγμα. Στις αναφορές [11-12] παρουσιάζονται εκλύσεις υδρογόνου σε κλειστούς χώρους με ανοίγματα. Τέλος στην αναφορά [13] παρουσιάζεται η τεχνική έκθεση του ατυχήματος της Στοκχόλμης (Σουηδίας) το 1983.

Στην παρούσα εισήγηση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής αξιολόγησης του πακέτου υπολογιστικής ρευστομηχανικής ADREA-HF [15] στη περίπτωση του ατυχήματος της Στοκχόλμης [13].

### Παράδειγμα Εφαρμογής: Το Ατύχημα Υδρογόνου της Στοκχόλμης (1983)

Μία έκρηξη συνέβη στις 3 Μαρτίου 1983, στην οδό Brahegatan, της κεντρικής Στοκχόλμης, Σουηδίας. Ένα ανοικτό φορτηγό παρέδιδε διάφορα βιομηχανικά αέρια σε εγκαταστάσεις στην περιοχή. Στη περιοχή της έκρηξης παραδιδόταν μία στήλη από φιάλες Αργού σε εργαστήριο, στο κτίριο δίπλα στο φορτηγό (Σχήμα 1). Ο οδηγός χειριζόταν τον γερανό στο πίσω μέρος του φορτηγού όταν άκουσε έναν ήχο σφυρίγματος. Ο οδηγός σταμάτησε αυτό που έκανε και πήγε να ελέγξει την πηγή του ήχου, οπότε συνέβη η έκρηξη. Το φορτηγό μετέφερε περίπου  $180 \text{ Nm}^3$  υδρογόνου σε 18 συνδεδεμένες φιάλες των 50 λίτρων υπό πίεση 200bar (Σχήμα 1). Η επίσημη έρευνα για το ατύχημα βρήκε ότι η έκλυση ήταν αποτέλεσμα σπασίματος στην συνδεσμολογία των φιαλών. Βαλβίδες αποκοπής δεν είχαν χρησιμοποιηθεί για να ασφαλισουν την κάθε φιάλη χωριστά. Τα κτίρια στην περιοχή του ατυχήματος ήταν κυρίως κατοικίες 5 έως 6 ορόφων. Η οδός Brahegatan είχε εγκάρσιο πλάτος 14 m, με πεζοδρόμια μήκους 2m εκατέρωθεν. Με βάση την επίσημη αναφορά δεν υπήρχαν θύματα, 16 άτομα τραυματίστηκαν, 10 αυτοκίνητα έπαθαν ζημιές, η πρόσοψη του κτιρίου πλησιέστερα στην έκρηξη έπαθε σοβαρές ζημιές και τέλος υπήρχαν σπασμένα παράθυρα σε ακτίνα 90 m.



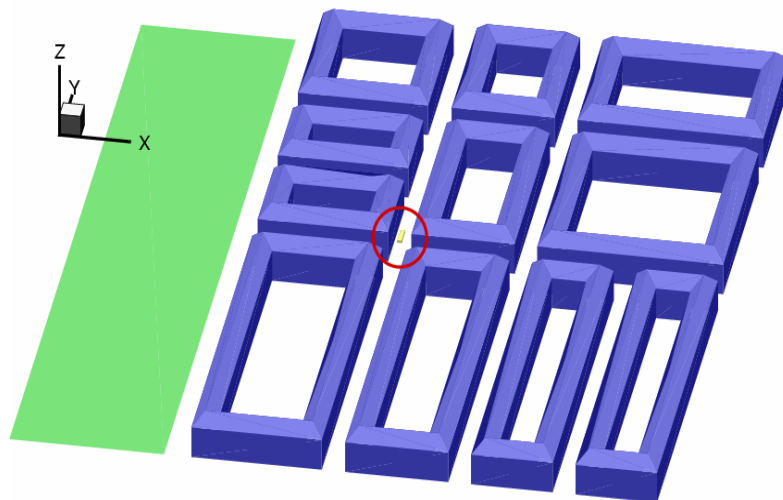
Σχήμα 1 Ατύχημα υδρογόνου στην Στοκχόλμη (α) Φορτηγό μετά την έκρηξη (β) Φιάλες υδρογόνου μετά την έκρηξη, όπου φαίνονται οι δύο θέσεις διακοπής της συνδεσμολογίας καθώς και οι κατευθύνσεις των τεσσάρων πηγών υδρογόνου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Η αριθμητική προσομοίωση του ατυχήματος [14] έγινε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος EHP-2 και περιλάμβανε τρεις φάσεις: την έκλυση, την διασπορά και την καύση. Για κάθε φάση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά υπολογιστικά εργαλεία, λόγω διαφοράς μεταξύ φυσικής και κλιμάκων μεταξύ των αντιστοίχων φαινομένων.

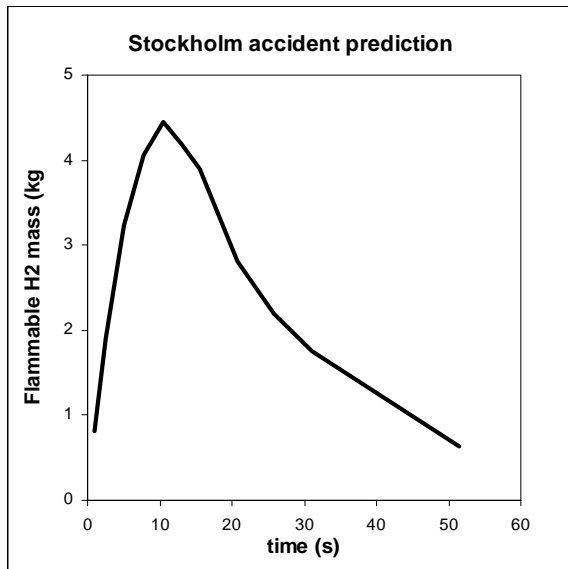
Οι υπολογισμοί έκλυσης έγιναν από το ΕΠΕΡ με τον κώδικα GAJET [14], όπου μοντελοποιήθηκαν οι 18 διασυνδεδεμένες φιάλες, υποθέτοντας ότι η έκλυση ήταν αποτέλεσμα των δύο σπασμένων συνδέσμων (Σχήμα 1), με συνέπεια την ύπαρξη 4 πηγών έκλυσης. Οι προβλεπόμενες συνθήκες (πίεση, θερμοκρασία και ταχύτητα) συναρτήσεως του χρόνου στα 4 σημεία εξόδου χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό της διασποράς.

Οι υπολογισμοί διασποράς έγιναν από το ΕΠΕΡ με τον κώδικα ADREA-HF [15], λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία της περιοχής (Σχήμα 2) σε έκταση έως και 200m γύρω από την πηγή. Οι μετεωρολογικές συνθήκες περιελάμβαναν άνεμο  $1 \text{ m s}^{-1}$  σε ύψος 10m, κατεύθυνσης  $220^\circ$  ( $70^\circ$  από τον άξονα X), θερμοκρασία  $-4^\circ \text{C}$  και σχετική υγρασία 98%. Στο Σχήμα 3α φαίνεται η προβλεπόμενη εξέλιξη με τον χρόνο της αναφλέξιμης μάζας του μίγματος αέρα υδρογόνου, η οποία εμφανίζει μέγιστη τιμή στα 10 sec. Η εικόνα του προβλεπόμενου αναφλέξιμου νέφους στα 10 sec φαίνεται στο Σχήμα 3β. Με βάση την αναφορά του ατυχήματος εκτιμήθηκε, ότι τα 10 sec αντιστοιχούν περίπου στον πραγματικό χρόνο έκρηξης, από την έναρξη της διαρροής. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών διασποράς (ροή και τύρβη) στα 10 sec, χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες για τους περαιτέρω υπολογισμούς καύσης.

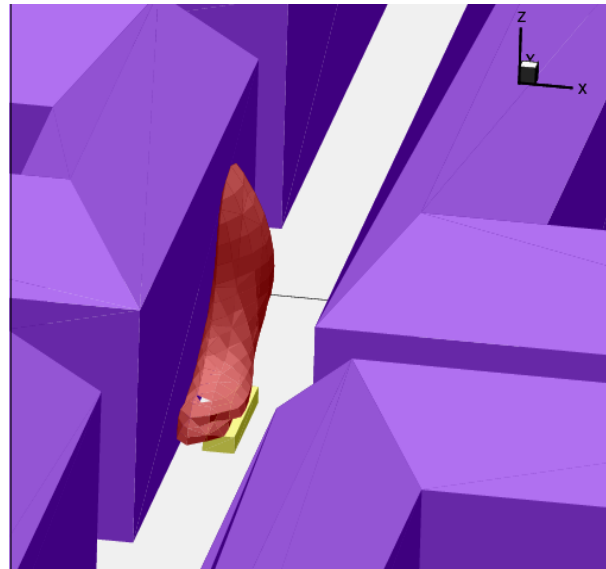
Οι υπολογισμοί καύσης έγιναν από το Κοινό Κέντρο Ερευνών Ispra με τον κώδικα REACFLOW [16]. Το σημείο έναυσης κατά τους υπολογισμούς καύσης τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του φορτηγού μεταξύ των κατακόρυφων φιαλών δίπλα στην στήλη του υδρογόνου. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η καύση του υδρογόνου έλαβε χώρα υπό συνθήκες αργής τυρβώδους ανάφλεξης, χωρίς εμφάνιση ηχητικών ταχυτήτων. Η προβλεπόμενη υπερπίεση στον τοίχο πλησίον του φορτηγού (Σχήμα 4α) ήταν λίγο πάνω από 1000 mbar, σε συμφωνία με την ζημιά που υπέστη η πρόσοψη του κτιρίου. Οι προβλεπόμενες ιστορίες υπερπίεσεων σε αποστάσεις 3.5, 13 και 23m από το σημείο έναυσης (Σχήμα 4β) είναι ικανές να οδηγήσουν σε θραύση παραθύρων (όριο θραύσης 25 mbar), σε συμφωνία με την αναφορά του ατυχήματος. Οι προβλεπόμενες υπερπίεσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις έδειξαν υπερπίεσεις χαμηλότερες του ορίου θραύσης, πιθανόν λόγω αραιού υπολογιστικού πλέγματος στις περιοχές αυτές.



Σχήμα 2 Υπολογιστικό χωρίο διασποράς, όπου φαίνονται τα κτίρια της περιοχής (μπλε), το φορτηγό (κίτρινο εντός κόκκινου κύκλου) και πάρκο (πράσινο).

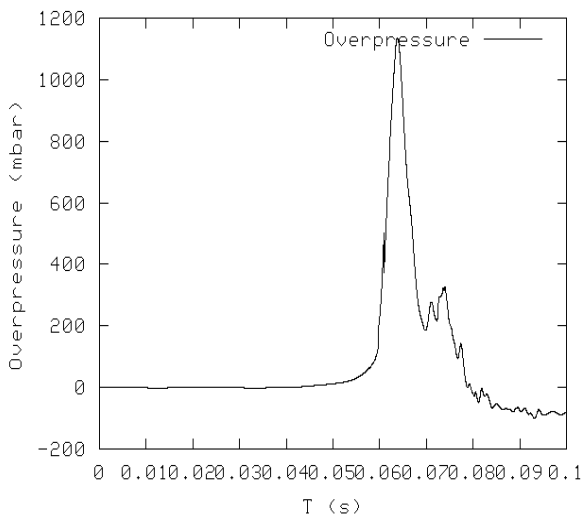


(α)

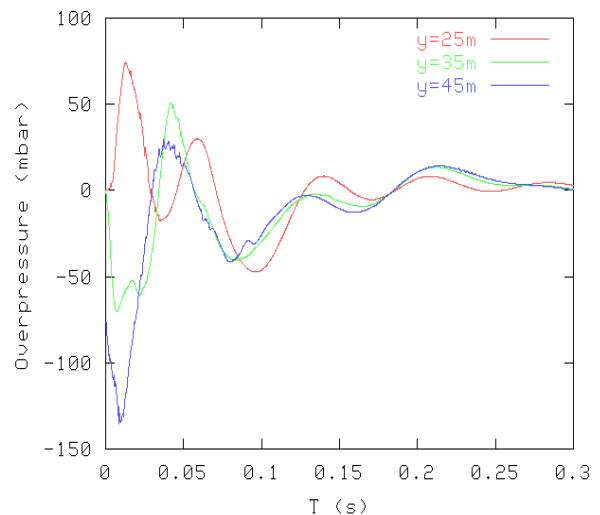


(β)

Σχήμα 3 Ατύχημα υδρογόνου στην Στοκχόλμη (α) Προβλεπόμενη ιστορία μάζας αναφλέξιμου υδρογόνου (β) Νέφος αναφλέξιμου υδρογόνου 10 δευτερόλεπτα μετά την αρχή της διαρροής



(α)



(β)

Σχήμα 4 Ατύχημα υδρογόνου στην Στοκχόλμη. Προβλεπόμενες ιστορίες υπερπίεσεων κοντά στο πλησιέστερο κτίριο και σε ύψος 1.35 m από τον δρόμο (α) Σε σημείο που βρίσκεται κοντά στο πίσω μέρος του φορτηγού (β) Σε τρία σημεία κατά μήκος του δρόμου μπροστά από το φορτηγό σε αποστάσεις 3.5, 13 and 23m από το σημείο έναυσης.

## Συμπεράσματα

Οι παρουσιασθείσες υπολογιστικές προσομοιώσεις έδειξαν κατ' αρχήν ότι η μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστομηχανικής και καύσης είναι πολύ σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση των συνεπειών από ατυχήματα υδρογόνου, για την κατανόηση των σχετικών φαινομένων διασποράς και καύσης, καθώς και για την διαμόρφωση μέτρων περιορισμού και προστασίας.

Οι παρουσιασθείσες υπολογιστικές προσομοιώσεις έδειξαν επίσης τις δυνατότητες του υπολογιστικού εργαλείου ADREA-HF στην πρόβλεψη της διασποράς υδρογόνου από αέριες εκλύσεις.

Ειδικότερα η προσομοίωση του ατυχήματος της Στοκχόλμης με τον κώδικα ADREA-HF για την διασπορά και τον κώδικα REACFLOW για την καύση, έδειξε ότι, η έναυση του υδρογόνου σε σχετικά ανοικτούς χώρους δεν οδηγεί υποχρεωτικά σε βίαια φαινόμενα καύσης.

Στο εγγύς μέλλον και στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Δικτύου Αριστείας HYSAFE, στο οποίο το ΕΠΕΡ μετέχει ως συντονιστής της δραστηριότητας ‘Εκκλιση και Διασπορά Υδρογόνου’, ο κώδικας ADREA-HF θα αξιολογηθεί περαιτέρω έναντι άλλων υπαρχόντων πειραμάτων.

## Βιβλιογραφία

- [1] “*Hydrogen Energy and fuel cells, a vision for our future*”, The High Level group for hydrogen and fuel cells, Final Report EUR 20719 EN, 2003.
- [2] Βενετσάνος Α.Γ., Μπάρτζης Ι.Γ., ‘Εκτίμηση Επικινδυνότητας Εφαρμογών Υδρογόνου’ Δημερίδα ΤΕΕ *Διαχείριση Επικινδυνότητας: Η εφαρμογή των Οδηγιών SEVESO I & II στην χώρα μας*, Αθήνα 4-5 Νοεμβρίου 2003, ΕΒΕΑ.
- [3] Witcofski R.D. and Chirivella J.E., (1984), “Experimental and analytical analyses of the mechanisms governing the dispersion of flammable clouds formed by liquid hydrogen spills”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol 9., No 5, pp 425-435.
- [4] Marinescu-Pasoi L., Sturm, B. “Messung der Ausbreitung einer Wasserstoff- und Propangaswolke in bebautem Gelände and Gasspezifische Ausbreitungsversuche”, Battelle Ingenieurtechnik GmbH, Reports R-68.202 and R-68.264, 1994.
- [5] Chitose I. K., Takeno K., Hayashi K., Hishida M. and Maruyama F.: Activities on Hydrogen Safety for WE-NET Project. *Proceedings the 13th World Hydrogen Energy Conference*, Beijing 2000.
- [6] Chaîneaux J., (1999), “Leak of Hydrogen from a pressurized vessel-Measurement of the resulting concentration field”, EIHP Workshop on dissemination of goals, preliminary results and validation of the methodology, Bruxelles, 11/3/99, pp.156-161.
- [7] Ruffin E., Mouilleau Y. and Chaîneaux J., (1996), “Large scale characterization of the concentration field of supercritical jets of hydrogen and methane”, *J. Loss Prevention Process Ind.*, 1996, vol. 9, pp. 279-284.
- [8] Shebeko Yu.N., Keller V.D., Yeremenko O.Ya., Smolin I.M., Serkin M.A., Korolchenko A.Ya., Regularities of formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in a large volume, *Chemical Industry*, 1988, Vol.21, pp.24(728)-27(731) (in Russian).
- [9] Yeremenko O.Ya., Budayev M.A., Shebeko Yu.N., Keller V.D., Distribution of Hydrogen in a System of Connected Industrial Enclosures. *Transactions of All-Russian Institute for Fire Protection: Provision of Fire Safety at Objects of Protection*, , 1989, pp.30-37 (in Russian).
- [10] Caron-Charles M. and Blumenfeld L., (2001), “The MISTRA experiment for Field Containment Code Validation: First Results” 9th Int. Conf. on Nuclear Engineering, ICONE-9, Nice, France, April 8-12, 2001.
- [11] Swain M. R., Grilliot E. S. and Swain M. N.: Risks incurred by hydrogen escaping from containers and conduits. NREL/CP-570-25315. *Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review*.
- [12] Swain M. R., Filoso P., Grilliot E. S. and Swain M. N.: (2003), ‘Hydrogen leakage into simple geometric enclosures’. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol 28, pp 229-248.
- [13] Gasexplosionen på Brahegatan I Stockholm den 3 Mars 1983, Kommittén (Kn 1981:02) för undersökning av allvarliga olyckshändelser, Utredningsrapport Nr.2: 1983, Stockholm (Summarized translation in English).
- [14] Venetsanos A.G., Huld T., Adams P., Bartzis J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modeling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, *Journal of Hazardous Materials*, A105, 1-25.
- [15] J.G. Bartzis, ‘ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain’ Report EUR 13580 EN, 1991.
- [16] H. Wilkening and T. Huld, “An adaptive 3--D CFD solver for modelling explosions on large industrial environmental scales”, *Combustion Science and Technology*, 149, pp. 361-388, 1999.